

В.М. ИоФФЕ

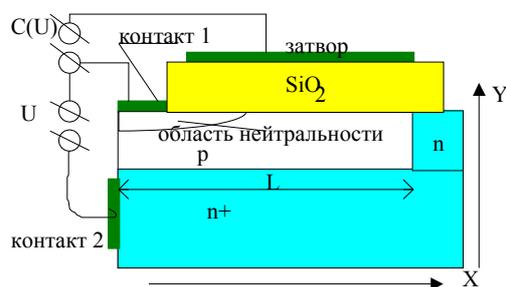
### ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ЕМКОСТЕЙ

Управляемые емкости впервые описаны в [1,2]. Мощность сигналов, при параметрическом усилении генерации и преобразовании частот, снимаемая с управляемых емкостей особенно в ВЧ и СВЧ диапазонах, может на порядки превосходить мощности снимаемые с других известных нам полупроводниковых приборов. Управляемые емкости также могут быть использованы в качестве трансформаторов и безинерционных конденсаторов переменной емкости с широким диапазоном перестройки.

Ниже рассмотрены вопросы изготовления управляемых емкостей. Приведены экспериментальные данные и результаты расчетов, объяснение которых позволило глубже понять физику прибора и конструировать более эффективные управляемые емкости.

#### 1. Изготовление управляемых емкостей.

Был изготовлен прибор в виде управляемой емкости, схематично изображенный ниже:



Фиг. 1 - устройство управляемого конденсатора

Содержащий неоднородно легированную вдоль  $x$   $p$ -область, степень легирования которой уменьшалась вдоль направления  $X$ , выполненную на площади от  $0,6$  до  $1$   $\text{мм}^2$  над сильно легированной областью  $n^+$  типа, затворный окисел толщиной  $0,2$   $\mu\text{м}$ , омические контакты к  $p$ - $n$  переходу и затвор на окисле. Длина  $p$ -области вдоль  $X$  варьировалась от  $10$  до  $50$   $\mu\text{м}$ .

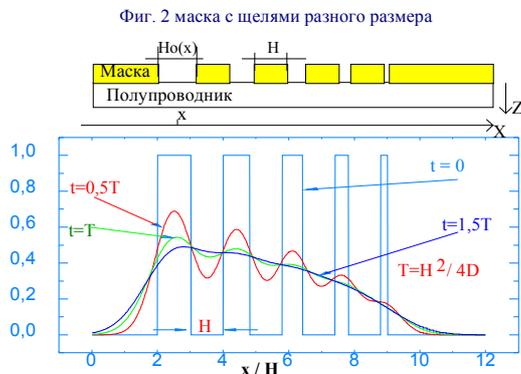
Предполагалось что постепенное увеличение запирающего напряжения на  $p$ - $n$  переходе приведет к уменьшению вдоль  $X$  размера области нейтральности вследствие чего наряду с уменьшением емкости  $p$ - $n$  перехода будет постепенно меняться управляемая емкость - емкость между омическим контактом к  $p$ -области и контактом затвора. Всего на шести кремниевых пластинах ( $100$ ) ориентации (представляющих из себя сильнолегированные сурьмой подложки  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  с эпитаксиальным покрытием толщиной  $12$   $\mu\text{м}$  и уровнем легирования  $n$  типа  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) при прохождении технологического маршрута были получено  $12$  вариантов приборов с различными примесными профилями.

Для получения неоднородного по площади профиля легирования нами был предложен и использован метод диффузии примеси через систему щелей, обеспечивающий (в рассматриваемых случаях) близкое к линейному изменение примесного профиля  $p$ -области вдоль  $X$ . Получение неоднородного по площади примесного профиля с необходимой степенью неоднородности путем диффузии примеси через систему щелей разного размера поясняется фиг.2. Примесь вводится в полупроводник через систему щелей после чего производится термический отжиг. Распределение примеси в полупроводнике в начальный момент времени под маской пренебрежимо мало а в открытом

полупроводнике определяются временем преддиффузии или ионной имплантации. Если время проведения диффузии  $t \sim H^2 / D$  то примесь проходит под маску за счет боковой диффузии от соседних щелей. Для дозы ионов вблизи отверстия шириной  $H_0(x)$  ( $H_{\min} \leq H_0(x) \leq H_{\max}$ ) можно записать  $Doza(x) \approx P(x) Doza_0$ ,  $P(x) = H_0(x) / (H_0(x) + H)$ , где  $Doza_0$  - доза примеси в открытой части полупроводника, приходящаяся на единицу площади в процессе предварительной диффузии или ионной имплантации.  $H_0(x)$  - размер отверстия в маске в окрестности конкретного значения  $X$  координаты,  $P(x)$  - прозрачность маски т.е. локальное отношение прозрачной части маски к локальной сумме размеров открытой и закрытой части маски,  $H$  - ширина маски (размер между соседними отверстиями),  $D$  - коэффициент диффузии. Если  $H_0(x)$  функция слабо зависящая от координаты (т.е. размер отверстий в маске постепенно уменьшается вдоль координаты  $x$ ) можно записать для распределения примеси воспользовавшись хорошо известной формулой для одномерной диффузии из ограниченного источника:

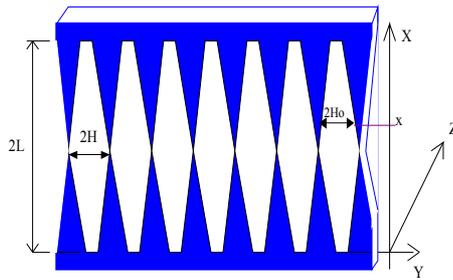
$$N(x,z) \approx P(x) Doza_0 (\pi Dt)^{-1/2} \exp(-z^2 / 4Dt) \quad (1)$$

$z$  - координата отсчитываемая от поверхности вглубь полупроводника. На фиг.3 приведены результаты решения уравнения диффузии примеси при различных временах диффузии через маску из 5 отверстий, размер которых линейно менялся от  $H$  до  $0,2H$  при размере между отверстиями  $H$ . Из полученных результатов следует, что для получения неоднородного монотонного профиля легирования требуется время порядка  $H^2 / 2,5D$ .



Фиг. 3 Зависимость распределения примеси под маской в различное время

Проведение диффузии примесей через систему щелей с неоднородным размером отверстий расположенных периодически вдоль  $X$  также описывается (1) и решает проблему создания неоднородного примесного по площади профиля (фиг 4). Очевидно что после отжига в результате диффузии примесей доза вводимых примесей в  $X$  сечении пропорциональна суммарному размеру отверстий в маске вдоль  $Y$  при времени отжига  $\geq H^2 / 2,5D$ , где  $2H$  период следования щелей вдоль  $Y$ .



Фиг. 4 - фрагмент маски для получения неоднородного по площади примесного профиля

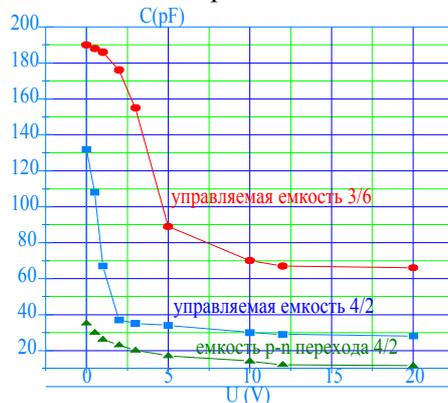
При изготовлении управляемых емкостей доза имплантируемого бора варьировалась от  $1 \cdot 10^{12}$  до  $3 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>, время отжига при 1200° С от 14 до 30 часов. Максимальный размер отверстий и период следования составлял 7 мкм минимальный размер - 2,8 мкм. Вследствие проведения отжига была сформирована р- область, в которой концентрация бора увеличивалась вдоль X по направлению к омическому контакту.

### 2. Странные результаты измерений ВФХ.

Расчетное значение напряжения перекрытия ( $U_p$ ) р- области во всех случаях не превышало 5 Вольт.

$$U_p = \max \left\{ \frac{q}{\epsilon_0} \int_0^d N_i(x, y, z) z dz \right\} < 5V$$

Предполагалось, что при подаче запирающего напряжения на р-п переход ОПЗ при напряжениях смещения больших напряжения перекрытия заполнит всю р-область и в этом случае величина минимальной управляемой емкости должна была стремиться к расчетной величине порядка 4- 6 пф (в зависимости от варианта). Но из результатов вольт-фардных измерений следовало что ни в одном случае не происходит полного обеднения р-области при подаче запирающего напряжения на р-п переход. Всегда оставалась примерно 1/3 - 1/5 - часть не обедненной даже при очень больших запирающих напряжениях (отношение величин минимальной к максимальной емкости превышало 1/5 тогда как при полном обеднении р- области должно было не превышать 1/30). Причем минимальное значение управляемой емкости практически не зависело от напряжения на затворе.



Фиг.5 - типичные ВФХ

### 3. Объяснение результатов измерений и уточнение теории и конструкции управляемых емкостей.

Для создания варикапов и управляемых емкостей с большим перекрытием требовалось ответить на два вопроса

1. Почему не происходит полного обеднения р-области подвижными носителями заряда?

2. Что надо сделать чтобы полное обеднение р-области подвижными носителями заряда происходило?

Численные эксперименты двумерного моделирования в приближении диффузия - дрейф дали ответ на первый вопрос и показали как изменить профиль легирования чтобы добиться полного обеднения р-области. Нами была поставлена и решена следующая задача:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\varepsilon} (N_d - N_a + p - n)$$

$$J_n = -q\mu_n \nabla \varphi + q \nabla D_n n$$

$$J_p = -q\mu_p \nabla \varphi - q \nabla D_p p$$

$$\frac{dn}{dt} = 0 = -U + \frac{1}{q} \nabla J_n$$

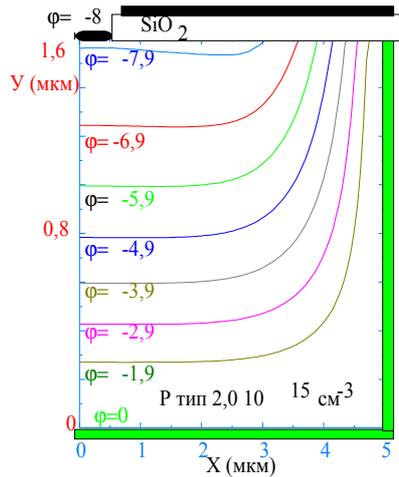
$$\frac{dp}{dt} = 0 = -U + \frac{1}{q} \nabla J_p$$

$$U = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)}$$

С граничными условиями:

На контактах выполняются условия термодинамического равновесия. **1)** На верхнем первом омическом контакте (часть верхней границы прямоугольника):  $\varphi = \varphi_1$ ,  $p = p_1$ ,  $n = n_1$ ,  $pn = n_1^2$ ,  $n-p = N_d - N_a$ . **2)** На втором омическом контакте (на нижней и правой границе прямоугольника) :  $\varphi = 0$ ,  $pn = n_1^2$ ,  $p = p_1 / \exp(f_s / kt)$ ,  $n = n_1 \exp(f_s / kt)$ . **3)** На левой границе:  $d\varphi/dx = 0$ ,  $dn/dx = 0$ ,  $dp/dx = 0$ . **4)** На границе изолирующий слой- полупроводник ( нормальная составляющая дырочного и электронного тока через изолирующий слой отсутствует ):  $J_y = 0$ ,  $J_n = 0$ ,  $d\varphi/dy = \text{const} = 0$ . В уравнениях  $\varphi$  - потенциал;  $J_p$ ,  $J_n$  - плотности дырочного и электронного тока соответственно;  $\mu_n$  - подвижность электронов;  $\mu_p$  - подвижность дырок;  $D_p$  - коэффициент диффузии дырок;  $D_n$  - коэффициент диффузии электронов;  $p$  - концентрация дырок;  $n$  - концентрация электронов;  $q$  - элементарный заряд;  $N_d - N_a$  - профиль распределения примеси;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость кремния;  $f_s$  - встроенный потенциал барьера;  $n_i$  - собственная концентрация электронов в кремнии;  $t_p$  - время релаксации дырок;  $t_n$  - время релаксации электронов. При решении задачи учитывались эмпирические зависимости  $\mu_{n,p} = \mu_{n,p}(E, N_d - N_a)$  [3] и соотношение Эйнштейна:  $\mu_{n,p} kT/q = D_{n,p}$ .

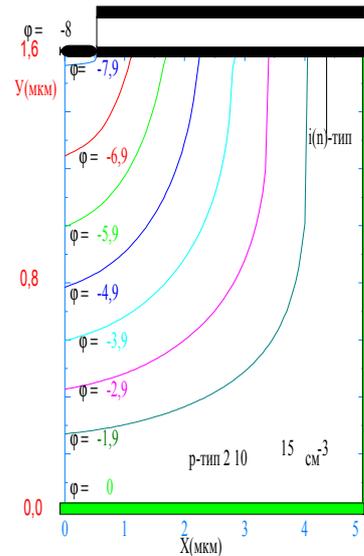
На Фиг. 6 приведено решение, представленное в виде линий равного потенциала для уровня легирования  $p$ -области  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , полученное на прямоугольной сетке (101x33) с пространственным шагом по  $x$  и  $y$   $5.0 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  при  $n_i = 1,510^{10} \text{ см}^{-3}$ , разности потенциалов между 1 и 2 контактами 8 В. ( $U = \varphi_1 - \varphi_2 = -8 \text{ В}$ ), при напряжении перекрытия  $\approx 4 \text{ В}$ ,  $f_s = 0.8 \text{ В}$ ,  $t_n = t_p = 10^{-8} \text{ сек}$ , при размере верхнего контакта  $0,5 \text{ мкм}$ .



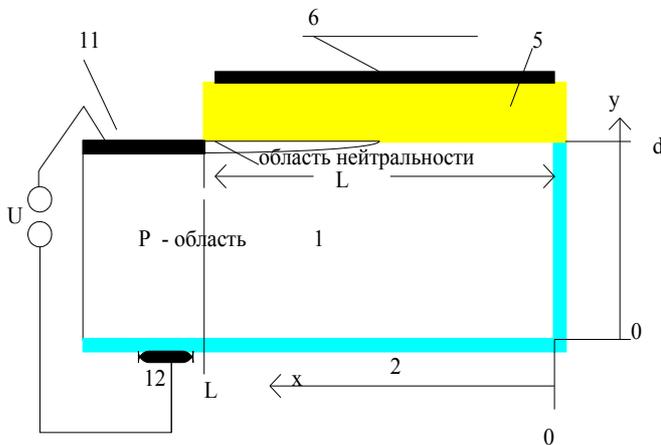
Фиг. 6 - Линии равного потенциала для однородно легированной р-области при  $U = 2U_p$

Заметим, что линия равного потенциала близкая по значению к потенциалу первого омического контакта (в данном случае  $\phi = -7,9$  Вольт) приблизительно соответствует границе области нейтральности, в которой потенциал меняется незначительно. Видно, что вблизи границы раздела изолирующий слой –полупроводник даже при существенном превышении межконтактной разности потенциалов ( $U$ ) над напряжением перекрытия ( $U_p$ ) имеется область нейтральности, граничащая с первым омическим контактом. **Из результатов расчетов и измерений следовало, что отсутствие полного обеднения р-области подвижными носителями заряда при  $U > U_p$  связано не с возможным технологическим браком, а с тем что минимальное напряжение между контактами при котором происходит полное поверхностное обеднение подвижными носителями заряда границы раздела между изолирующим слоем и р-областью значительно превосходит по величине напряжение перекрытия.** Численные эксперименты показали что при формировании под изолирующим слоем тонкого слоя n или i-типа слоя происходит полное обеднение р-области подвижными носителями заряда при  $U_p \leq U$ .

На Фиг. 7 приведено решение, представленное в виде линий равного потенциала для уровня легирования р-области  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , полученное на прямоугольной сетке ( $101 \times 33$ ) с пространственным шагом по  $x$  и  $y$   $5.0 \cdot 10^{-8} \text{ м}$  при  $n_i - 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , разности потенциалов между 1 и 2 контактами 8 В. ( $U = \phi_1 - \phi_2 = -8 \text{ В.}$ ), при напряжении перекрытия  $\approx 4 \text{ В}$ ,  $f_s = 0.8 \text{ В}$ ,  $t_n = t_p = 10^{-8} \text{ сек}$  при выполнении участка под изолирующим слоем толщиной с пространственный шаг с низким уровнем легирования  $\approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Этот результат, полученный методом численного тыка ( для нахождения условий обеднения р-области при  $U \approx U_p$  использовался простой перебор параметров в программе ) и то обстоятельство что без n(i)- слоя не наблюдалось полного обеднения р-области нашли объяснение, приводимое ниже.



Фиг 7 - Линии равного потенциала для однородно легированной р-области при  $U=2U_p$  с формированием под окислом i(n)-слоя



Фиг.8 Отсутствие поверхностного обеднения при обеднении объема обл. 1 подвижными носителями заряда при подаче на полупроводниковый переход запирающего напряжения

Для объяснения полученных результатов измерений и расчетов обратимся к фиг. 8, на которой изображен полупроводниковый прибор, содержащий полупроводниковый слой 1 для определенности выбранный с дырочным типом проводимости с первым омическим контактом 11, выполненным на части верхней поверхности означенного первого полупроводникового слоя, на другой части верхней поверхности сформирован изолирующий слой 5 на поверхности которого сформирован проводящий участок 6, второй слой 2, сформированный на нижней и (для удобства рассмотрения) правой боковой поверхности первого полупроводникового слоя с омическим контактом 12, слой 2 для определенности в рассматриваемом случае выполнен в виде контакта Шоттки. Для наглядности не нарушая общности рассуждений рассмотрим плоскую задачу ( $N_i(x,y) = N_a - N_d$ ).

При постоянном значении нормальной к поверхности границе раздела полупроводник-изолирующий слой составляющей электрического поля ( $E_y = \text{const}$ ) (что

соответствует подаче постоянного напряжения в том числе и нулевого между омическим контактом к первому полупроводниковому слою и контактом (проводящим участком) на изолирующем слое ) уравнение Пуассона вблизи поверхности  $dE_x/dx + dE_y/dy = q/\epsilon(-Ni(x,y) + p-n)$  преобразуется к виду:

$$dE_x/dx = q/\epsilon (- Ni(x,y) -n + p) \quad (2)$$

поскольку  $E_x \equiv -d\phi/dx$  имеем из (2) при полном обеднении Р-области на границе раздела между изолирующим слоем и р-областью ( $n,p \ll Ni(x,y)$ ):  $d^2\phi/dx^2 = q/\epsilon Ni$  при  $y = d, 0 \leq x \leq L$ , где  $\phi$  - потенциал, L – размер первого полупроводникового слоя под изолирующим слоем вдоль направления x. Решая это уравнение при  $\phi(0,d) = 0$ , при  $d\phi(x,d)/dx = 0$  получим

$$\phi(x, d) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^x N_i(h, d) h dh; \quad \phi(L, d) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^L N_i(h, d) h dh;$$

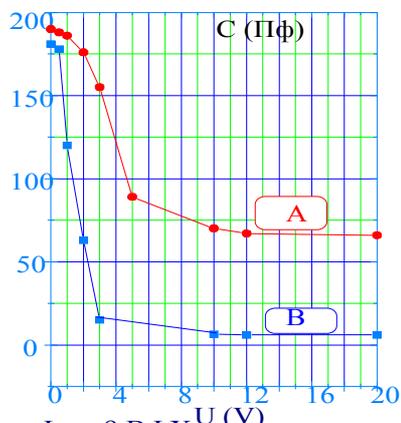
Здесь  $\phi(L,d)$  минимальное напряжение между контактами при котором происходит полное **поверхностное обеднение** подвижными носителями заряда р-области на границе раздела между изолирующим слоем и р-областью.  $\phi(L,d)$  включает в себя встроенный потенциал  $f_s$  - напряжение на первом полупроводниковом слое при отсутствии внешнего смещения. При  $L \gg d$  и внутри р –области в условиях обеднения  $Ni(x,y) \gg n,p$  можно полагать что потенциал меняется вдоль y значительно сильнее чем по x и уравнение Пуассона  $dE_x/dx + dE_y/dy = q/\epsilon (- Ni(x,y) + p-n)$  с учетом того, что  $E_x \equiv -d\phi/dx, E_y \equiv -d\phi/dy$  выглядит:  $d^2\phi/dy^2 = q/\epsilon Ni(x,y)$ , и при граничных условиях  $\phi(x,0)=0, d\phi(x,y)/dy=0$  имеет решение:

$$\phi_1(x, y) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^y N_i(h, d) h dh; \quad \phi_1(x, d) = \frac{q}{\epsilon} \int_0^d N_i(h, d) h dh;$$

Здесь  $\phi_1(x,d)$  минимальное напряжение между контактами, при котором происходит обеднение р-области в объеме в x сечение при  $0 < y < d$ . Причем  $\phi_1(x,d)$  включает в себя встроенный потенциал  $f_s$ . Заметим, что  $\max(\phi_1(x,d)) \equiv U_p$  – величина напряжения между контактами при котором происходит **обеднение объема** подвижными носителями заряда р-области.

Если  $U_p < U_i$  и  $\phi(L,d) < U_i$  ( где  $U_i$  напряжение пробоя области1), то при напряжении на полупроводниковом переходе U при условии, что  $U \geq U_p, U \geq \phi(L,d)$  т.е. при выполнении одновременно условий поверхностного обеднения и обеднения объема область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется на весь объем

полупроводникового слоя 1 (фиг.7). Если  $U_p < U_i$  и  $\phi(L,d) > U_i$  то при напряжении на полупроводниковом переходе  $U$  при условии, что  $\phi(L,d) \geq U \geq U_p$  ОПЗ распространяется на весь объем полупроводникового слоя 1 за исключением верхней поверхности полупроводникового слоя часть которой граничащая с изолирующим слоем и контактом не обедняется (см фиг.6,8). Если под изолирующим слоем сформирован слой 3 (например противоположно легированный с 1) образующий полупроводниковый переход со слоем 1 то поверхность слоя 1 контактирующая со слоем 3 изначально обеднена основными носителями заряда. В этом случае при выполнении условия обеднения объема происходит полное обеднение слоя 1 подвижными носителями заряда. Что объясняет как численные расчеты в диффузионно – дрейфовом приближении так и экспериментальные данные по измерению емкости р-п перехода и управляемой емкости  $C(U)$  – емкости образованной между омическим контактом к первому полупроводниковому слою и проводящим участком на изолирующем слое. На фиг.9 представлены результаты измерения управляемых емкостей: А- без слоя n-типа проводимости под затворным окислом, В - со слоем n-типа проводимости под затворным окислом. Слой n-типа проводимости под затворным окислом был выполнен ионной имплантацией фосфора (энергия-70 КэВ, доза-  $1,5 \cdot 10^{11}$  ион  $\text{см}^{-2}$ ) перед термическим выращиванием затворного окисла. Минимальное значение управляемой емкости в В-случае соответствовало расчетному пределу.



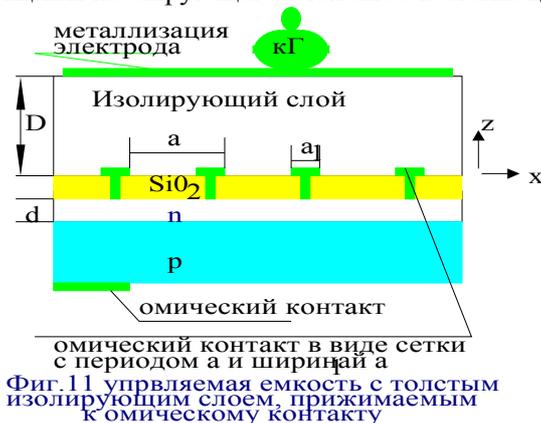
Фиг. 9 ВФХ управляемых емкостей:  
А - без n-слоя под затворным окислом,  
В - с n-слоем под затворным окислом.

#### 4. Практические рекомендации.

Одним из преимуществ управляемой емкости является то, что в отличие от других полупроводниковых приборов снимается так называемое электронное ограничение по мощности связанное с электрическим пробоем полупроводника и ограничениями налагаемыми на размер рабочей области полупроводникового прибора величиной скорости перемещения подвижных носителей заряда (с управляемой емкости можно снимать большие мощности в том числе и на больших частотах при параметрическом усилении генерации и преобразовании частоты). Однако чтобы на практике воспользоваться этим следует учитывать что параллельно управляемой емкости всегда включен р-п переход

последовательно соединенный с емкостью образованной затвором и подложкой (n-типа в рассмотренном случае, см. фиг.1). Простейшая эквивалентная схема управляемой емкости приведена на фиг. 10, где  $C_{pn}$  – емкость р-п перехода,  $C_{пз}$  – емкость подложка- затвор,  $C_{рз}$  – емкость р-область-затвор,  $U_c$ - внешнее напряжение на управляемой емкости.

Часть внешнего напряжения сосредоточенная на р-п переходе должна быть меньше напряжения пробоя:  $U_c/(1+ C_{pn}/C_{пз}) < U_i$  или если требуется хорошая развязка между входом ( контакты р-п перехода) и выходом ( контакт к р-области и затвор) часть внешнего напряжения сосредоточенная на р-п переходе должна быть много меньше управляющего напряжения подаваемого на переход:  $U_c/(1+ C_{pn}/C_{пз}) \ll U$ . То есть почти всегда следует стремиться отношение  $C_{pn}/C_{пз}$  делать большим. Что реализуется либо включением параллельно р-п переходу дополнительной емкости либо увеличением толщины изолирующего слоя либо комбинацией того и другого.



Толстые изолирующие слои имеют большое пробойное напряжение и позволяют подавать и снимать с управляемой емкости большую мощность. Создание толстых ( $>10$  мкм) изолирующих слоев для планарной технологии не простая задача (за исключением случая когда в качестве изолирующего слоя используется высокоомная подложка ( i-типа), но очень толстые изолирующие слои приводят к непомерному снижению перекрытия по емкости в этом случае возникает проблема создания изолирующего слоя толщиной меньше 100 - 150 мкм, что связано с ограничениями налагаемыми на толщину подложек, обеспечивающую достаточную механическую прочность для прохождения технологических маршрутов). В свою очередь с целью уменьшения сопротивления растекания и увеличения добротности прибора омический контакт к р-области имеет смысл выполнять в виде сетки. На фиг. 11 приведена конструкция управляемой емкости с сеточным омическим контактом к n-области с периодом a и шириной  $a_1$ , и изолирующим слоем. Приграничный слой  $SiO_2$  и n-области легирован примесями р-типа. Изолирующий слой выполнен отдельно и прижимается металлизацией электрода к остальной части прибора, выполненной по планарной технологии. Конструкция приводит к снижению коэффициента перекрытия по емкости при

относительно больших толщинах изолирующего слоя. Найдем минимальную емкость структуры с толстым изолирующим слоем. (В литературе известны решения аналогичных задач выражаемые через эллиптические функции [4] приведение здесь полученных результатов или их аппроксимаций, выражаемых через элементарные функции [5] в применении к рассматриваемой задаче нецелесообразно, т.к заняло бы много больше места чем приводимое ниже решение.)

При  $D \gg a \gg a_1$  потенциал сетки имеющей период  $a$  вдоль  $x$  и электрода отстоящего от сетки на расстоянии  $D$  в диэлектрике с хорошей степенью точности описывается выражением:

$$\varphi = A \cos(x / 2\pi a) \exp(-z / 2\pi a) + (\delta / \epsilon)(z-D) \quad (3)$$

Первый член суммы (3) описывает периодический потенциал вблизи сетки, второй – потенциал вблизи электрода, а непосредственной подстановкой можно убедиться, что (3) является решением уравнения Лапласа., где  $\delta$  - поверхностная плотность заряда электрода,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость изолирующего слоя,  $A$  - постоянная,  $a$  - период сетки вдоль  $x$ ,  $a_1$  - ширина полоски, из которых состоит сетка.  $A$  и  $\delta$  определяются граничными условиями. Если  $a \ll D$  то часть потенциала определяемая  $A \cos(x / 2\pi a) \exp(-z / 2\pi a)$  пренебрежимо мала и  $\varphi = 0$  при  $z = D$ ; при  $z = 0$  и  $\cos(x / 2\pi a) = -1$  имеем для потенциала контактов  $\varphi = A + D \delta / \epsilon$  (периодические контакты располагаются в экстремуме (3) при  $z=0$  поскольку потенциал контактов постоянен, а функция вблизи экстремума не меняется). Дифференцируя (3) по  $z$  при  $z=0$ ,  $\cos(x / 2\pi a) = -1$  и учитывая, что поле вблизи сетки складывается из поля сетки равном  $1/2 a/a_1 \delta / \epsilon$  и электрода равном  $1/2 \delta / \epsilon$  получим:  $A / 2\pi a + \delta / \epsilon = 1/2 a/a_1 \delta / \epsilon + 1/2 \delta / \epsilon$  откуда  $A = \pi a \delta / \epsilon (a/a_1 - 1)$  или  $\varphi = \pi a \delta / \epsilon (a/a_1 - 1) + D \delta / \epsilon$ , или емкость единицы площади такой структуры равна  $\delta / \varphi = \epsilon / D (1 / (1 + (a/a_1 - 1) \pi a / D))$ . Коэффициент перекрытия по емкости при этом равен:  $K = 1 + \pi a / D (a/a_1 - 1)$ . Если параллельно p-n переходу включена емкость большого номинала, то  $K = 2 / [1 + 1 / (1 + \pi a / D (a/a_1 - 1))]$ . При этом добротность и максимум коэффициента модуляции соответственно равны  $Q \approx D d / (\epsilon \rho \omega (a - a_1)^2)$ ,  $m_{\max} \approx (1 - K) / (1 + K) \approx 0,5 (a/a_1 - 1) \pi a / D$

Пример Расчет управляемой емкости для преобразователя частоты с

1 ГГц в 5 ГГц мощностью 200 Вт. (при варакторном преобразовании частоты максимальная мощность на два порядка ниже). На p-n переход подается сигнал с частотой  $F_{\max}$  -  $F_{\min} = 4$  ГГц на управляемую емкость  $F_{\min} = 1$  ГГц и колебательным контуром выделяется частота  $F_{\max} + F_{\min}$ . Определение параметров управляемой емкости (фиг. 11).

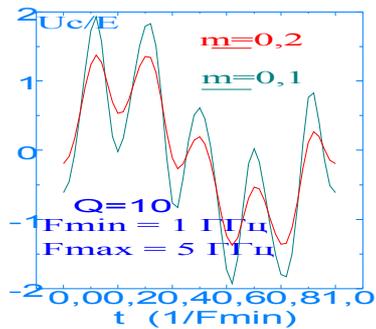
1. Период сетки ( $a$ ) удовлетворяет соотношению:  $a < V_s / (F_{\max} + F_{\min}) = 1e5 (м/сек) / 5e9 (Гц) = 20$  мкм.  $V_s$ - скорость насыщения электронов в кремнии. Положим  $a = 7$  мкм, при  $a_1 = 1$  мкм.

2. Изолирующий слой выполняем из кварца (электрическая прочность  $10^9$  В/м) толщиной 100 мкм.,  $K = 2 / [1 + 1 / (1 + \pi a / D (a/a_1 - 1))] \approx 1,4$   $m_{\max} \approx (1 - K) / (1 + K) \approx 0,2$

3. Горизонтальные размеры n-области ( $a_x$ ) выбираем из условия  $a_x = \lambda / 20 = c / 20 F_{\max} \epsilon_{отн кв}^{1/2} \approx 1,5$  мм., при этом максимальная емкость равна:  $C_{\max} = 2\epsilon a_x^2 / D = 1,5 e-12$  Ф.

4. Параметры легирования *n*-области могут меняться в широких пределах, для определенности положим толщину *n*-области равной 1мкм при уровне легирования  $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

5. Найдем максимальное напряжение на управляемой емкости и минимальное значение емкости  $C_{//}$ , включенной параллельно *p-n* переходу (из условия, что часть напряжения в цепи управляемой емкости приходящаяся на *p-n* переход  $\approx 1\text{В}$ ).  $U_c = (2 P Q / F_{\min} (0,5 C_{\max}))^{1/2} \approx 1000 \text{ В}$  при  $Q=10, P=200\text{Вт.}, C_{//}=0,5 C_{\max}$   $U_c / 1\text{В} \approx 7,5 \times 10^9$ .



Фиг. 12. Зависимость напряжения управляемой емкости от времени при преобразовании частоты в последовательном колебательном контуре

На фиг.12 приведена расчетная зависимость напряжения на управляемой емкости от времени в последовательном колебательном контуре при различной степени модуляции управляемой емкости ( $E$  – амплитуда низкочастотного сигнала,  $m$ -коэфф. модуляции)

Более подробное изложение части материала статьи отражено в поданных нами заявках (например[6,7]). В заключении благодарности: Колесникову В.И. и Луневу А.С. без финансовой поддержки которых работы бы не было, Кореневу А.Г., Максutowу А.И., Старцеву А.И., Фридману Ю.М. – за помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе В.М. ‘Полупроводниковые приборы на основе модуляции площади электродов’, Электроника НТБ, 6/97, с.5-10
2. Ioffe V.M., Maksutov A. I. Pct Pub. №: WO97/23001.
3. Кремлев В.Я. Физико- топологическое моделирование структур элементов БИС, ‘Высшая школа’, 1990, стр. 41-42
4. Г. Бухгольц, Расчет электрических и магнитных полей, стр., 245-249, Москва, И.Л., 1961
5. Гупта К., Машинное проектирование СВЧ устройств., стр 46-54, ‘Радио и Связь’, 1987г.
6. Иоффе В.М., Максutow А.И. Патент РФ № 2139599
7. Иоффе В.М., Максutow А.И., заявка на изобретение РФ №20001320351